

世界の次世代炉研究開発と 国際協力の進展

Next Generation Reactor R&D and International Cooperation Development

日本原子力学会2004年秋の大会

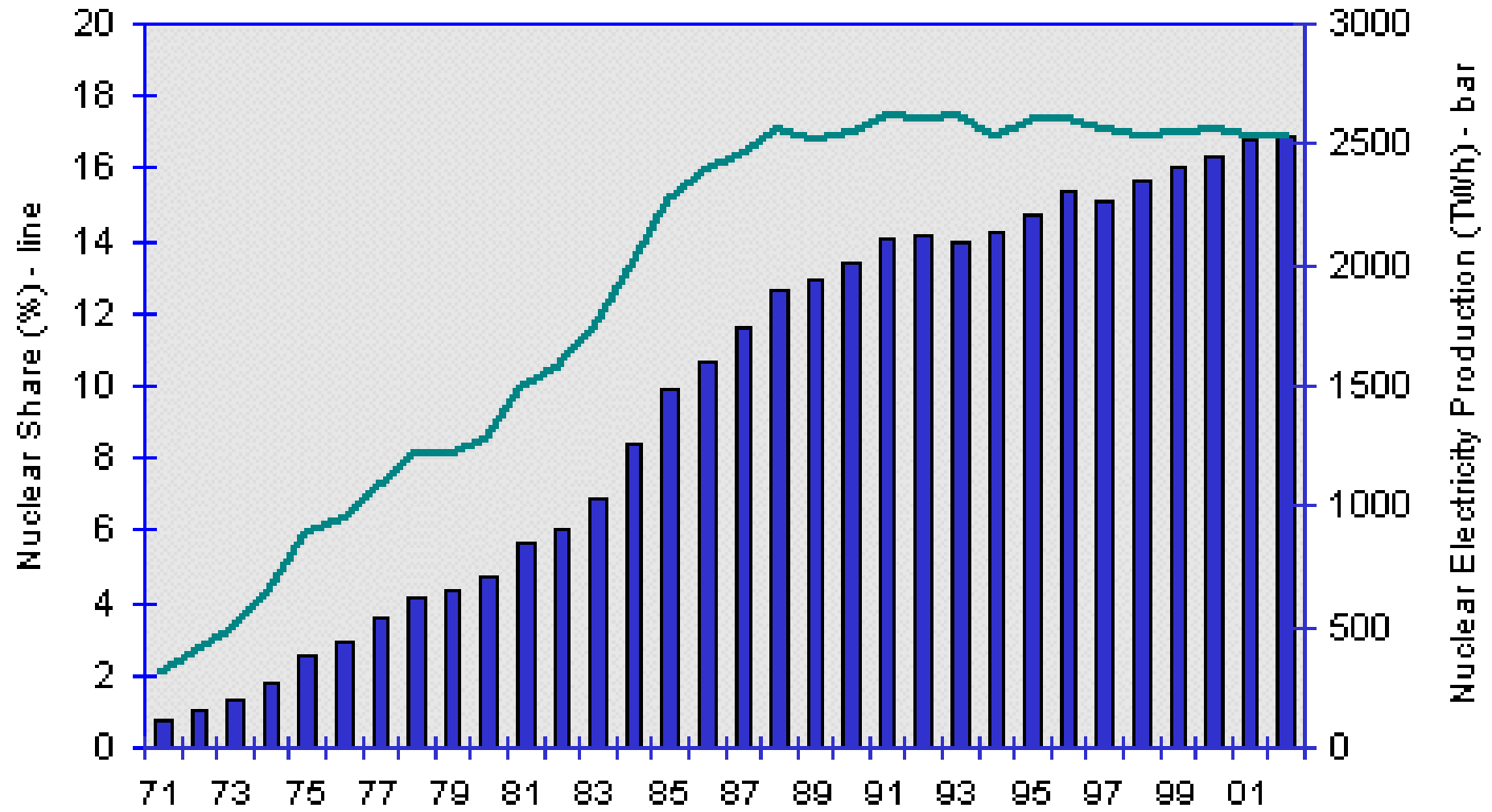
財団法人エネルギー総合工学研究所 研究理事

東京工業大学 COE-INES客員教授

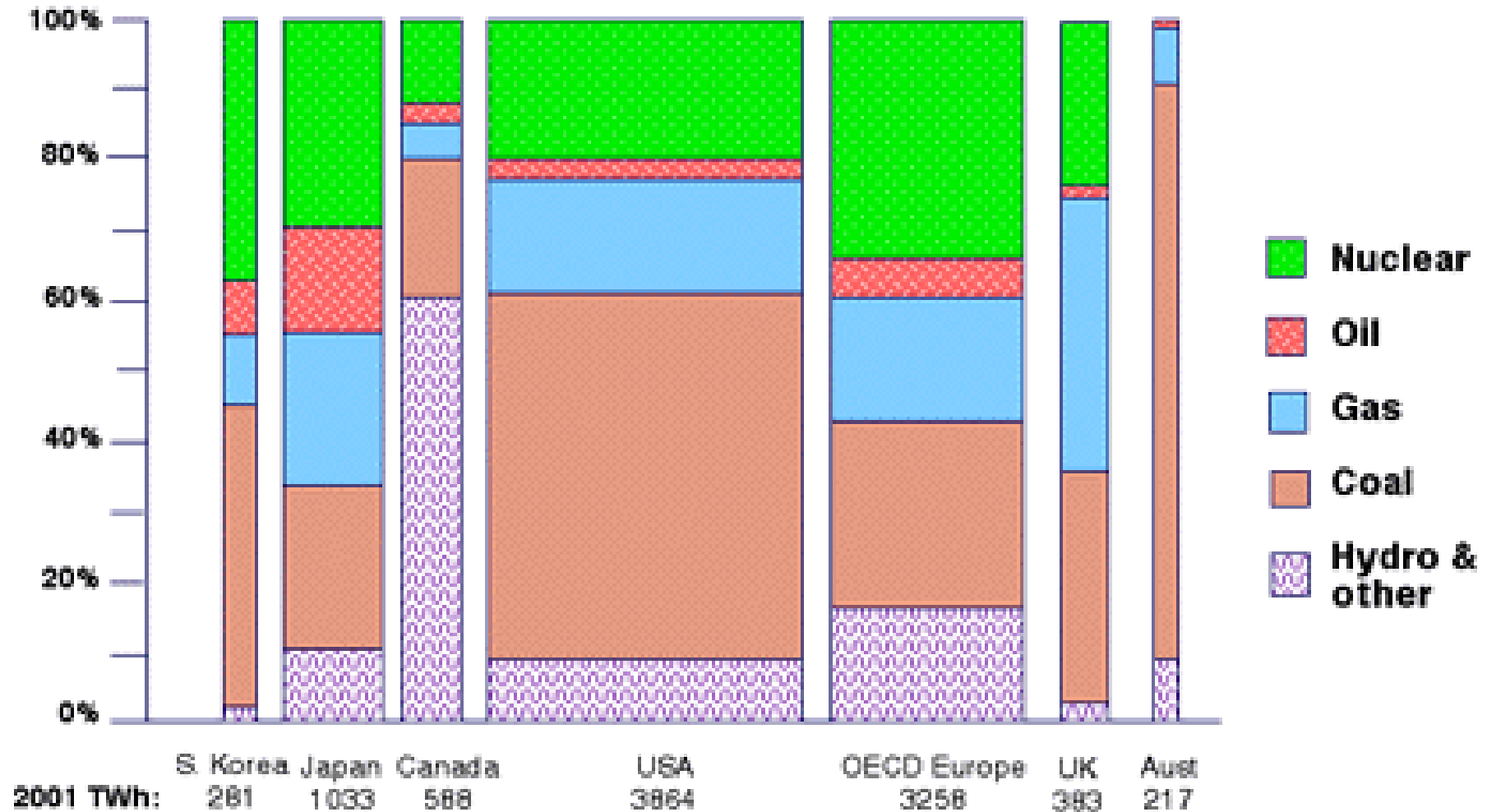
松井一秋

September 17, 2004

Nuclear Electricity Production and Share of Total Electricity Production



Fuel for electricity generation (percent)



Width of each bar is indicative of power generated (gross production)

Source: OECD/IEA 2003, *Energy Balances of OECD Countries 2001*.

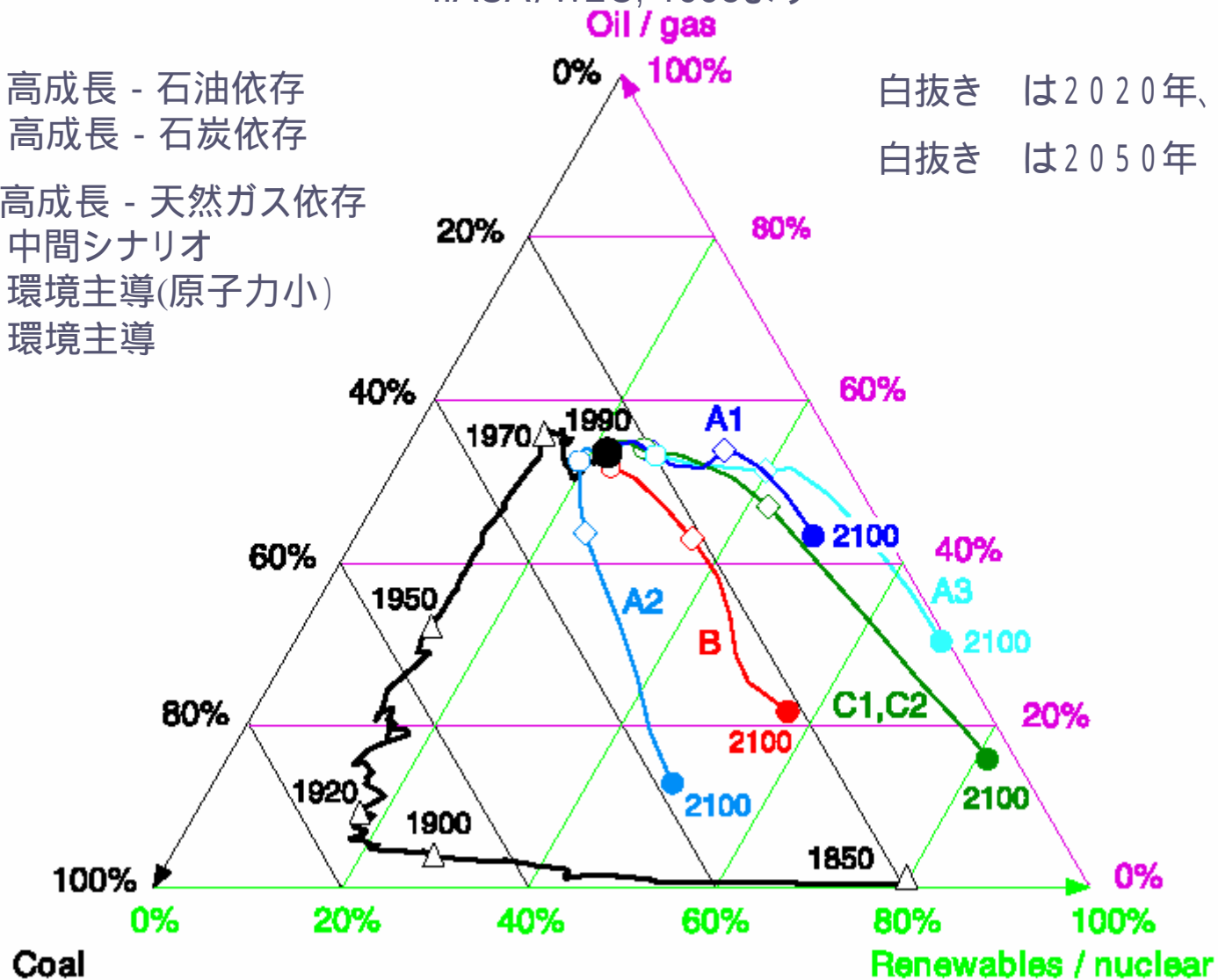
一次エネルギー供給構造の変遷

[非化石エネルギー 石炭 石油 そして再び非化石エネルギーに]

IIASA/WEC, 1998より

- A1: 高成長 - 石油依存
- A2: 高成長 - 石炭依存
- A3: 高成長 - 天然ガス依存
- B: 中間シナリオ
- C1: 環境主導(原子力小)
- C2: 環境主導

白抜き は2020年、
白抜き は2050年



The Evolution of Nuclear Power

Generation I



Early Prototype Reactors



- Shippingport
- Dresden, Fermi I
- Magnox

Generation II



Commercial Power Reactors



- LWR-PWR, BWR
- CANDU
- VVER/RBMK

Generation III



Advanced LWRs



- ABWR
- System 80+
- AP600
- EPR

Near-Term Deployment

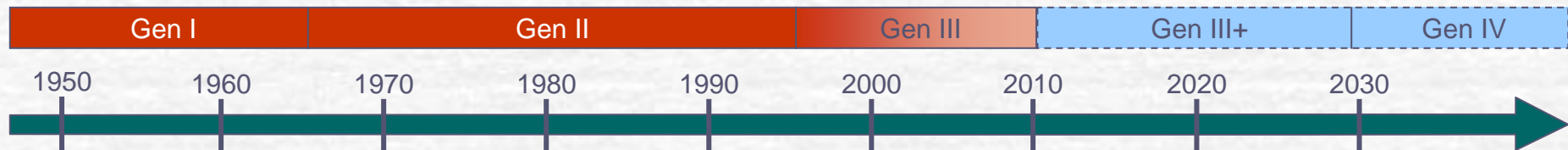


Generation III+ Evolutionary Designs Offering Improved Economics

Generation IV



- Highly Economical
- Enhanced Safety
- Minimal Waste
- Proliferation Resistant



第4世代国際フォーラム (GIF)

複数の原子力エネルギーシステムの開発

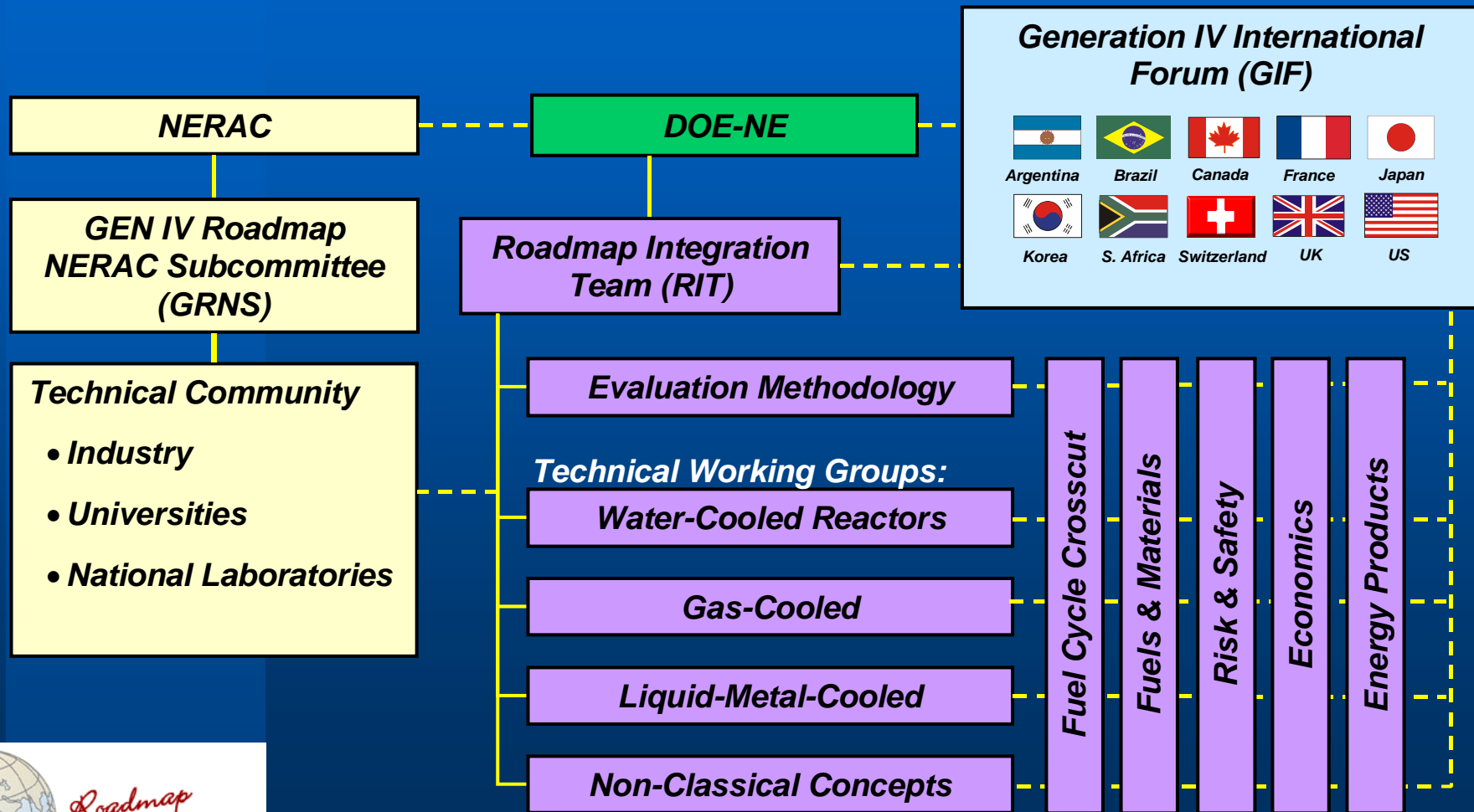
- 2030年までに実用化
- 大幅な技術革新
 - 持続可能性
 - 安全性と信頼性
 - 拡散抵抗性と物質防護
 - 経済性
- あらゆる市場で競合可能
- 多様なエネルギー利用: 電気、水素、淡水化、熱



+EU: 2003年

INPROとの相互補完?

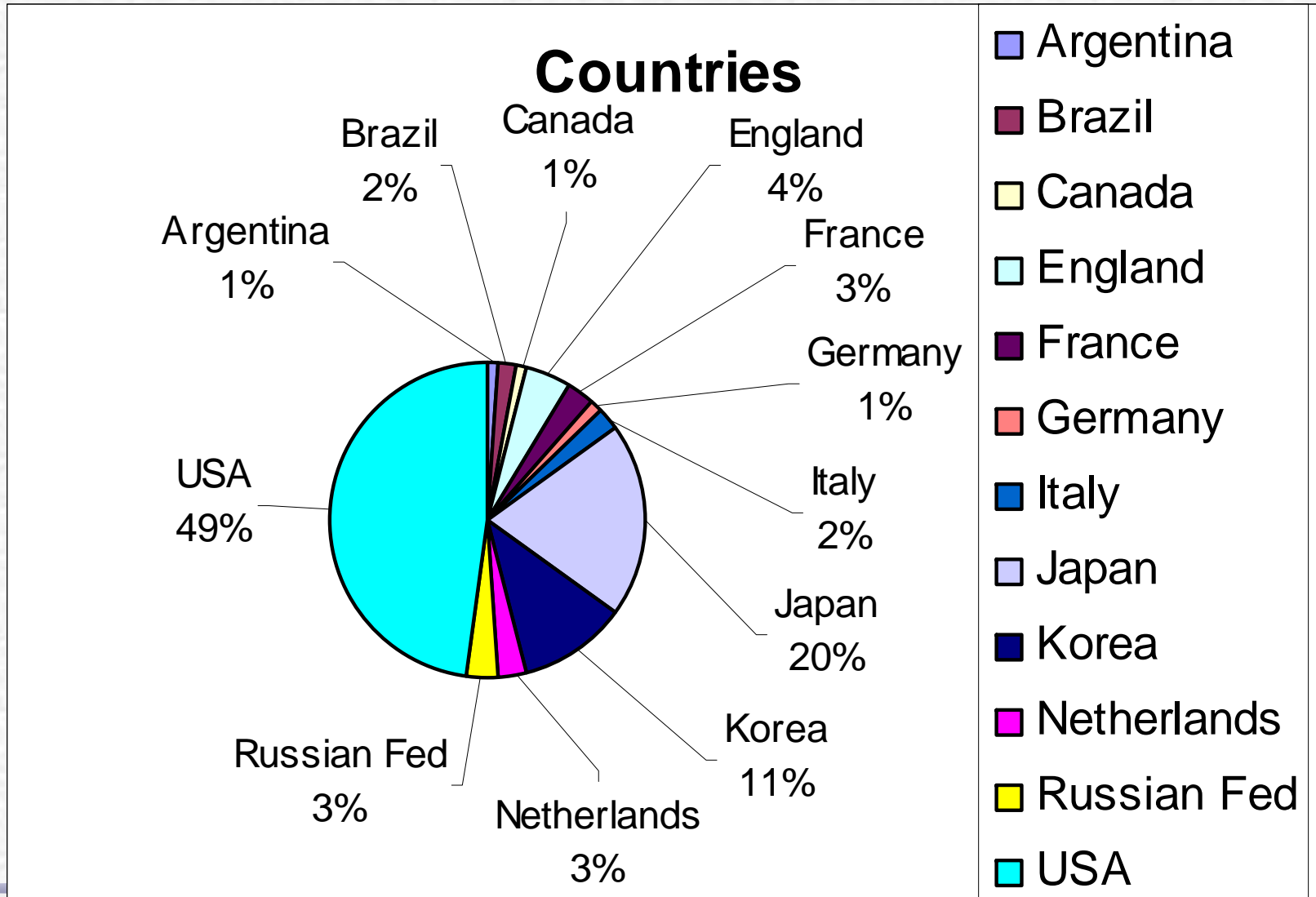
Overall Roadmap Organization



International Participation in Generation IV Roadmap

	Water	Gas	Liquid Metal	Non-Classical	Eval. Methods	Fuel cycle
Argentina						
Brazil						
Canada						
France						
Japan						
Korea						
South Africa						
United Kingdom						
United States						

Generation IV Systems: Request for Information

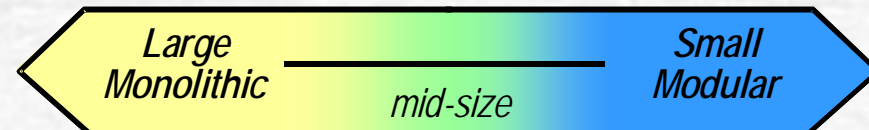
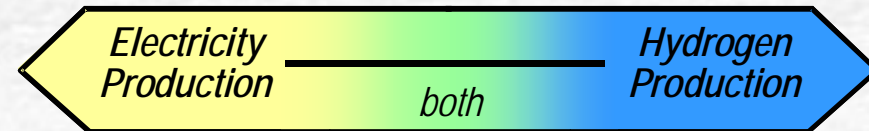


第4世代ロードマップの評価指標

大目標	目標	1次指標	2次指標	
持続可能性	資源利用	ウラン消費量		
		環境影響(資源確保による影響)		
		他資源の利用、枯渇		
	廃棄物最小化と管理	高レベル廃棄物最小化	廃棄物重量	
			廃棄物体積	
			長期経過後発熱量	
			長期経過後放射性毒性	
	核拡散抵抗性	環境影響(高レベル廃棄物以外)	廃棄物管理の負担	
			兵器級原料への分離回避性	
			仕様済み燃料特性	
安全性と信頼性	通常運転時の安全性、信頼性	サボタージュなどに対する耐性		
		信頼性		
		平常時の公衆および従業員被曝 事故時従業員安全性(被曝など)		
	炉心損傷防止(DBA)	工学的安全性の頑強性	簡易、頑強な反応度制御	
			簡易、頑強な崩壊熱除去	
			事象モデルの確実性、検	
	敷地外緊急時退避不要性	ソースターム	モデルの確実性	
			燃料の熱的応答	
			モデルの縮尺度	
			ソースタームの大きさ	
エネルギー放出特性				
経済性	コスト	格納系の影響緩和機能	炉心損傷発生までの時間 放射性物質の保持能力	
		個人リスク		
		集団リスク		
	リスク	炉建設期間	建設費(炉)	
			運転費/燃料費	
			投資額	
			収益性	

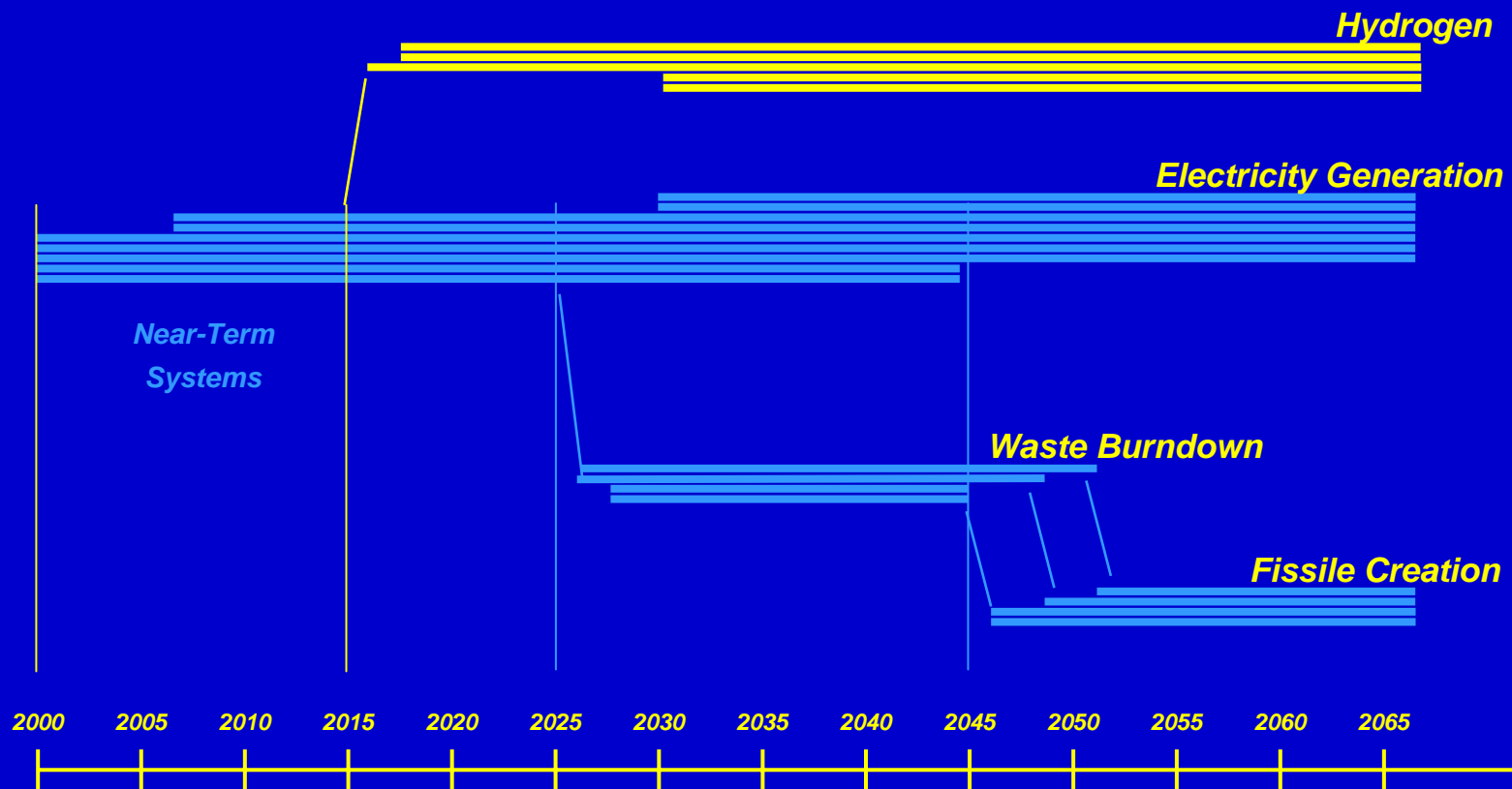
多様な原子力エネルギー利用

- 第4世代コンセプトは異なる市場で複合的な応用を目指す



What Systems are Needed?

4: Hydrogen, or other products near and long-term



第4世代原子力システム候補

Water-cooled systems

- W1 - Integral primary system reactors
- W2 - Simplified BWR
- W3 - CANDU NG
- W4 - SCWR, thermal
- W5 - SCWR, fast
- W6 - High conversion BWR

Gas-cooled systems

- G1 - PBR open cycle
- G2 - PMR open cycle
- G3 - VHTR open cycle
- G4 - Generic gas - closed cycle
- G5 - Gas fast reactor

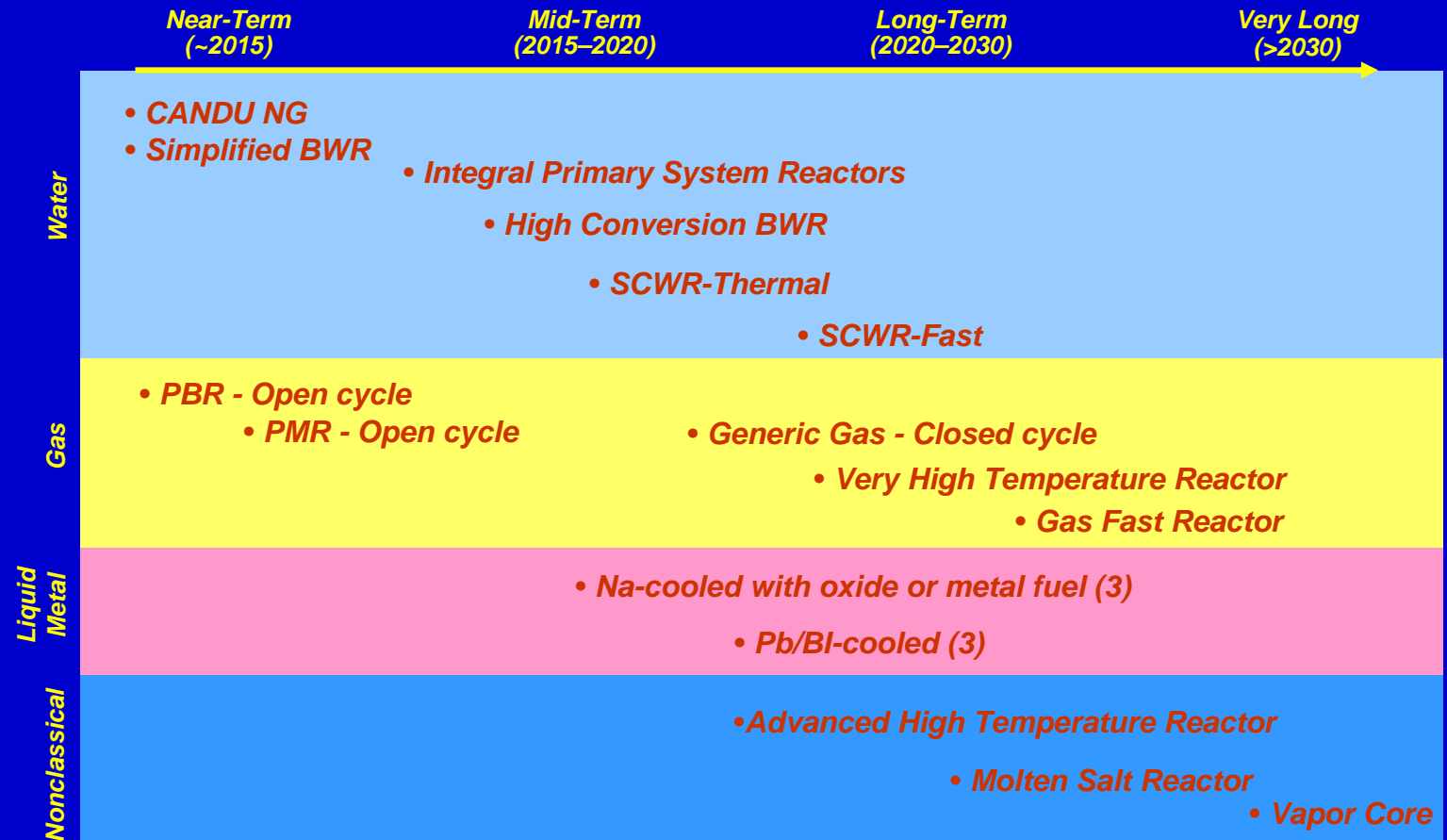
Liquid-metal cooled systems

- L1 - Na cooled, oxide fuel
- L2 - Na cooled, metal fuel
- L3 - Na cooled, metal fuel, Japan
- L4 - Medium Pb/Pb-Bi cooled, US
- L5 - Medium Pb/Pb-Bi cooled, Russia
- L6 - Small Pb/Pb-Bi cooled

Non-classical systems

- N1 - Molten salt core
- N2 - Gas core
- N3 - Molten salt cooled

どのシステムが利用可能か？



ミッションとの関係の例

Mission:

発電

水素

廃棄物燃焼

燃料生成

Water

Gas

Liquid
Metal

Non-
Classical

CANDU NG

PBR/PMR

VHTR

SCWR Fast

GFR

Na LMR;
Pb/Bi

AHTR

MSR

Na LMR

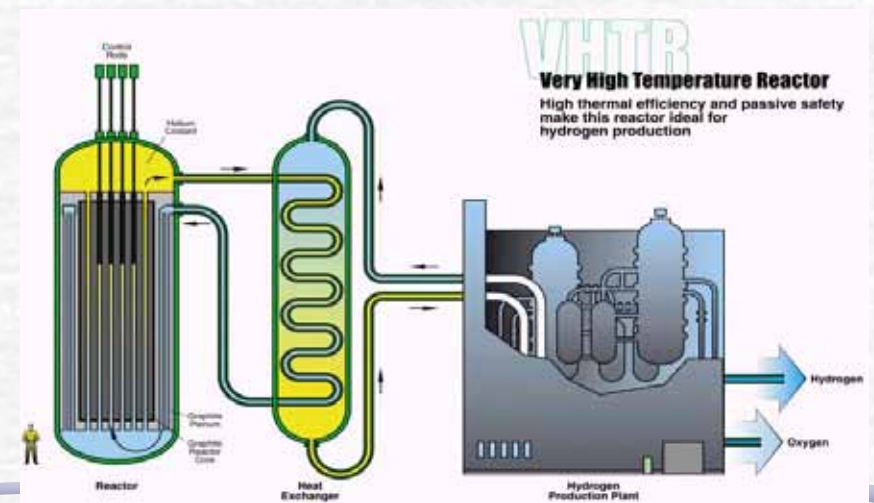
Generation IV Systems

	<i>Acronym</i>	<i>Coolant</i>	<i>Neutron</i>
<i>Gas-Cooled Fast Reactor</i>	<i>GFR</i>	<i>Gas</i>	<i>Fast</i>
<i>Lead-Cooled Fast Reactor</i>	<i>LFR</i>	<i>Liquid Metal</i>	<i>Fast</i>
<i>Molten Salt Reactor</i>	<i>MSR</i>	<i>Molten Salt</i>	<i>Thermal</i>
<i>Sodium-Cooled Fast Reactor</i>	<i>SFR</i>	<i>Liquid Metal</i>	<i>Fast</i>
<i>Supercritical Water-Cooled Reactor</i>	<i>SCWR</i>	<i>Water</i>	<i>Thermal – (Fast)</i>
<i>Very High Temperature Reactor</i>	<i>VHTR</i>	<i>Gas</i>	<i>Thermal</i>

VHTR

Very High Temperature Reactor Objectives

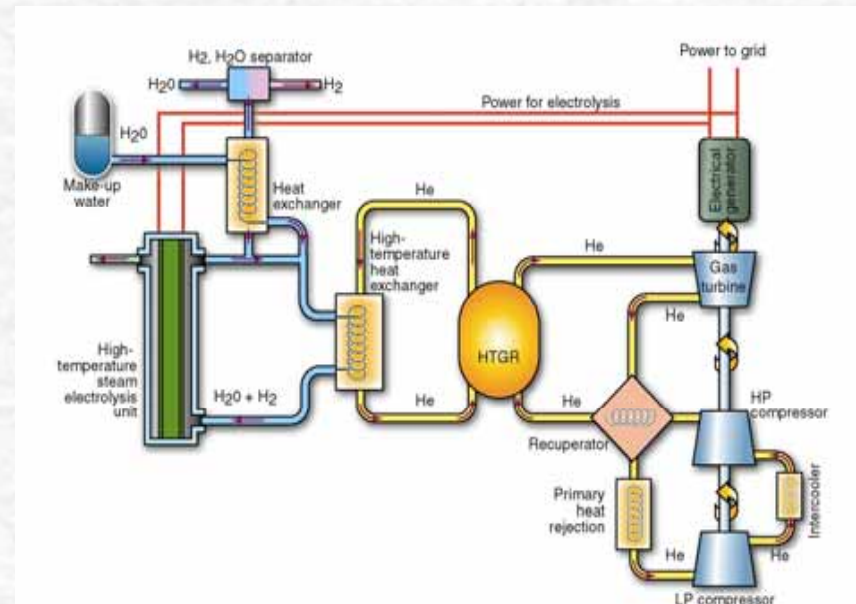
- Thermal neutron spectrum and a once-through uranium cycle
- Primarily envisioned for missions in hydrogen production and other process-heat applications (outlet temperatures above 1000 ° C), it could produce electricity as well
- Operating at an efficiency of over 50%, such a plant would produce over 200 metric tonnes of hydrogen per day (equivalent to 300,000 gallons of gasoline per day)
- The reference reactor concept has a 600-MWth helium-cooled core based on either the block-type core or a pebble type core
- Estimated by the Roadmap to be deployed in 2020; based on interest this may be accelerated to 2015 - 2017



VHTR Objectives (2/2)

- Bridge to the hydrogen economy
 - Hydrogen fuel cells
 - Zero-emissions transportation fuel
 - Distributed energy opportunity
 - Large-scale, zero emissions hydrogen production is an enabling technology

- Water is the preferred hydrogen “fuel”
 - Electrolysis using off-peak power
 - High-temperature electrolysis
 - High-temperature thermo-chemical water splitting



VHTR

The most pressing R&D issues associated with the VHTR are:

Design and Safety

- Pre-conceptual design, safety studies, product contamination transfer, integration and economics

Fuel and fuel cycle

- SiC & ZrC coated particles, fuel behavior modeling, burn-up extension

Materials and components

- Materials and components development & characterization, corrosion and irradiation tests
- Intermediate Heat Exchanger and Isolation valve etc
- Materials behavior modeling

Hydrogen Production

- Thermo-chemical properties database and rate constant measurements
- Laboratory-scale integral test, pilot-scale experiments
- Materials (corrosion) and components development (isolation valve)
- Connection technology: demonstration phase

High performance helium turbine

- Development of very high temperature turbo-compressor
- Development of other key components for HT Brayton conversion system

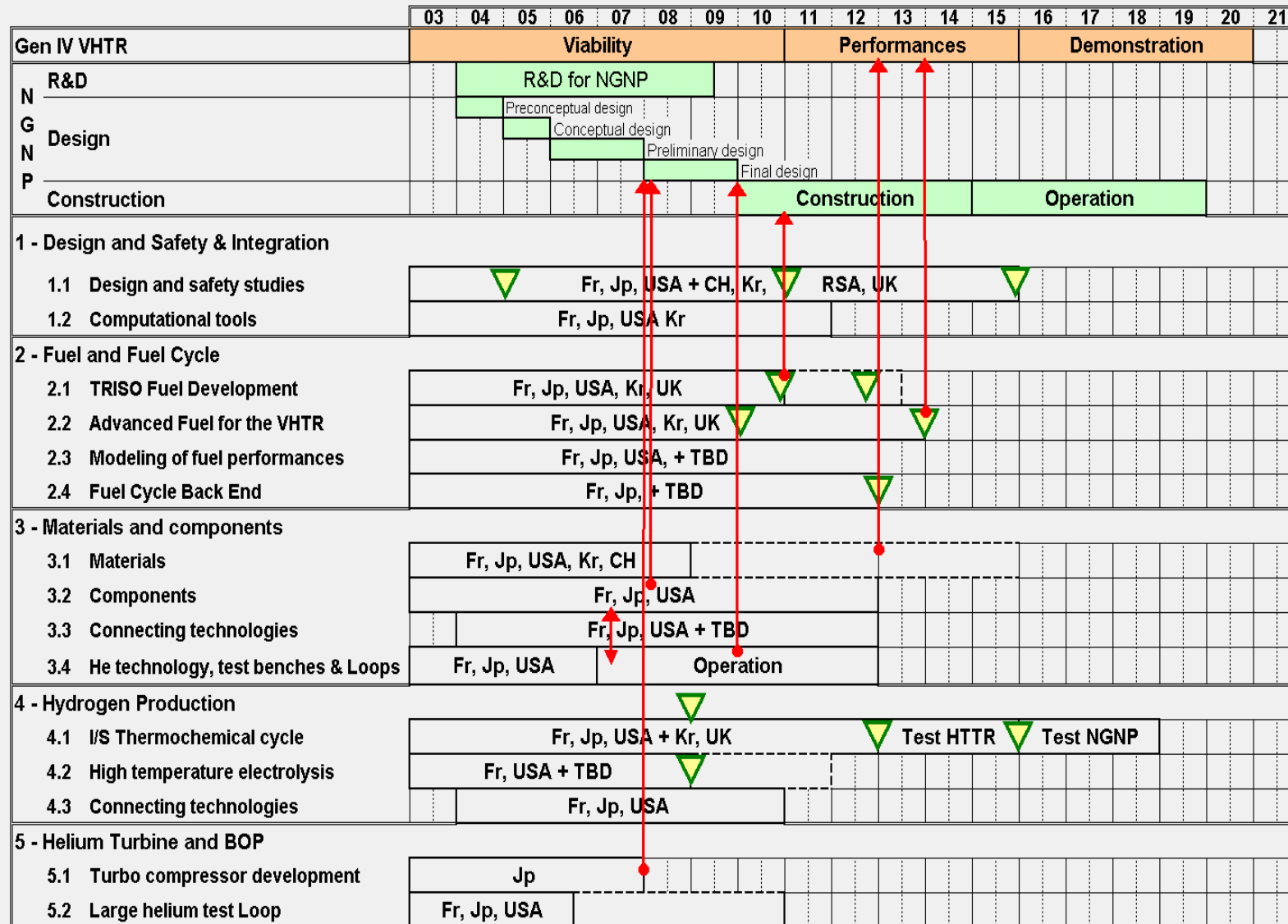
Issues about the R&D Plan

- ☞ Connections with current or planned reactor projects
 - NGNP (USDOE, Idaho)
 - GT-HTR-300 (Jaeri, Japan)
 - PBMR (Eskom, South Africa)

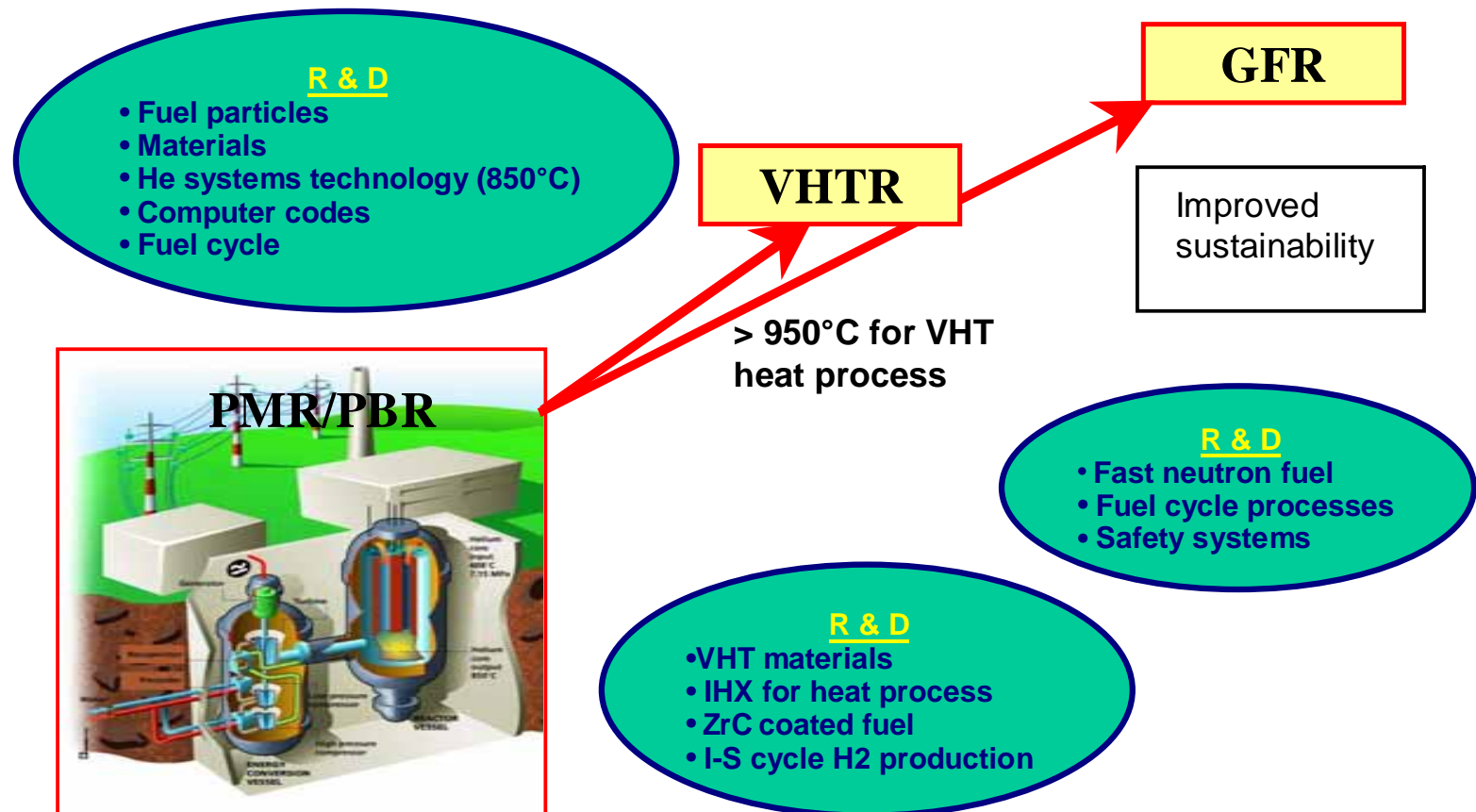
→ Baseline for a reference VHTR system

HTR-PM (China Huaneng Group), 16-20 modules by 2,020
- ☞ “Common trajectory projects” with other Generation IV systems
 - GFR: Materials & components, BOP & turbo-machinery, Hydrogen production
 - Fuel cycle crosscut R&D project
 - Economics & prospective studies (Hydrogen...)

VHTR – Global R&D plan



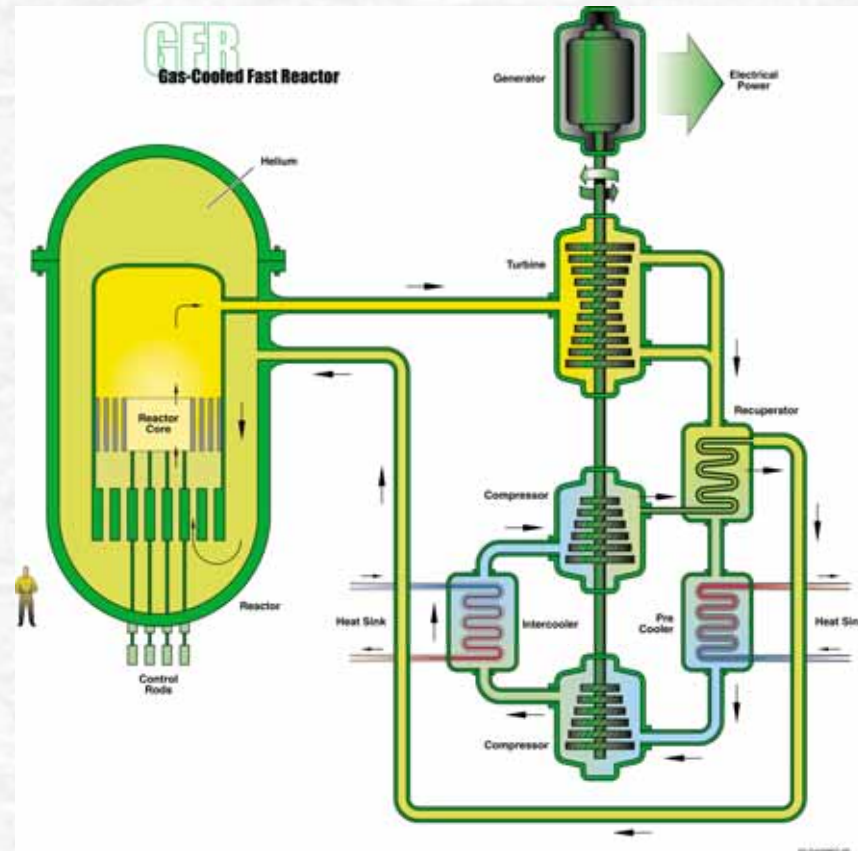
Gas Reactor Technology



GFR

Gas cooled Fast Reactor Objectives

- High level of safety
- High sustainability; minimize or eliminate “waste”, and efficient use of resources
- Fast- spectrum core
- High-efficiency energy conversion
- Production of H_2
- Estimated deployment time: 2025



The most pressing R&D issues associated with the GFR are:

☛ Design and Safety

- Need to show excellent safety capability
 - Decay heat removal during transients
 - Ability to withstand other transient events (core melt exclusion strategy)

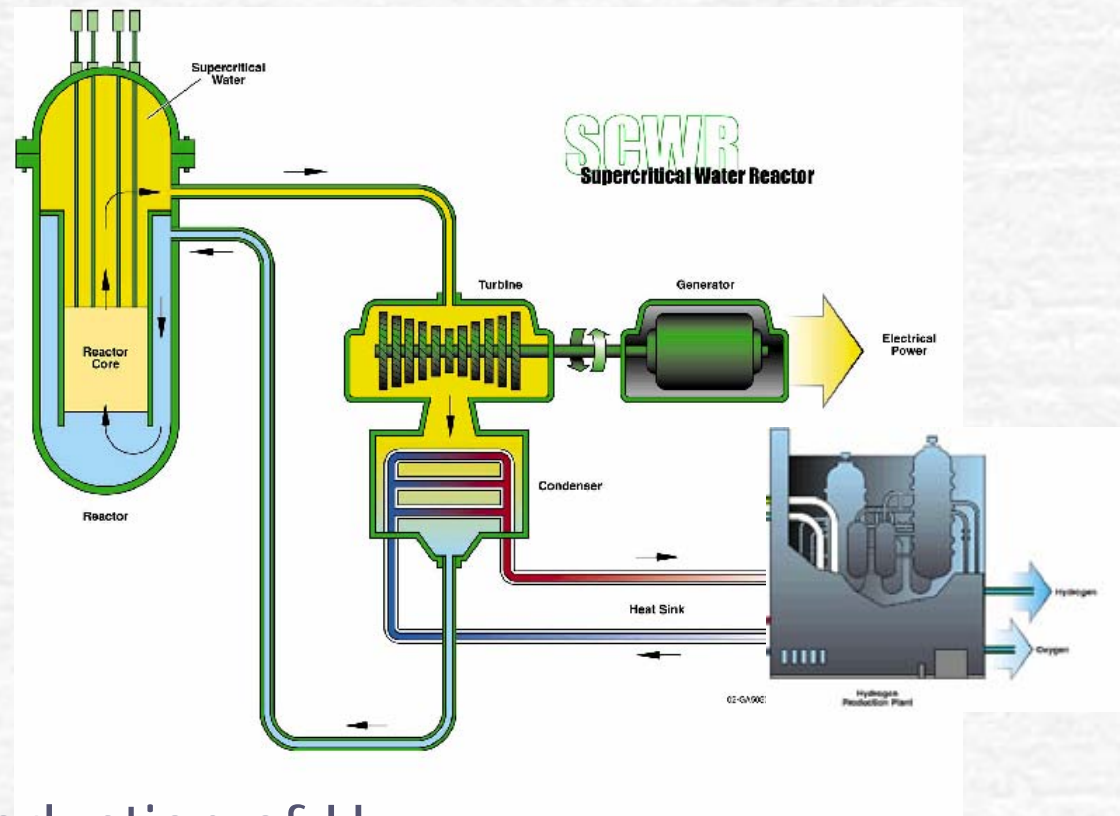
☛ Fuels, Materials, and Fuel Cycle

- Need to identify and test high temperature fuels and materials (both in- and out-of-pile)
 - Screening, testing, and fabrication of ceramic or ceramic/metallic fuels for high temperature, high fluence use
- Need to identify and test fuel treatment and refabrication processes

SCWR

Super Critical Water Reactor Objectives

- Major economic advantage
- High level of safety
- Flexible fuel cycle system(s) and proliferation resistant
- Direct SCW cycle, very high-efficiency energy conversion (>44%)
- Direct and Indirect Production of H₂
- Original estimated deployment time: 2025



GIF SCWR R&D Plan

- To establish viability and advance the concept to technical maturity (i.e. to enable build project)
- 5 Key Technology Areas (w/lead authorship)
 - Design and Integration (Japan)
 - Materials and Chemistry (Canada)
 - Safety (U.S.)
 - Thermal hydraulics (Korea)
 - Hydrogen (Canada) – a recent addition to the list

SFR Priority R&D Project(1)

System Integration & Safety

Design Evaluation Study

(1) Core Design and fuel options

- └ Core design for Partitioning and Transmutation (UK, JP, KR, US, FR)

(2) System Design options

- └ Identification and assessment of system design features (JP, KR, US, FR)
- └ Assessment of Economic Performances (JP,)
- └ Decommissioning (FR,)
- └ Extrapolation from the Lead Reactor System (FR, JP)

(3) Demonstration Facility (JP,)

Safety Evaluation Study

(1) Passive Safety Test (US, KR, JP)

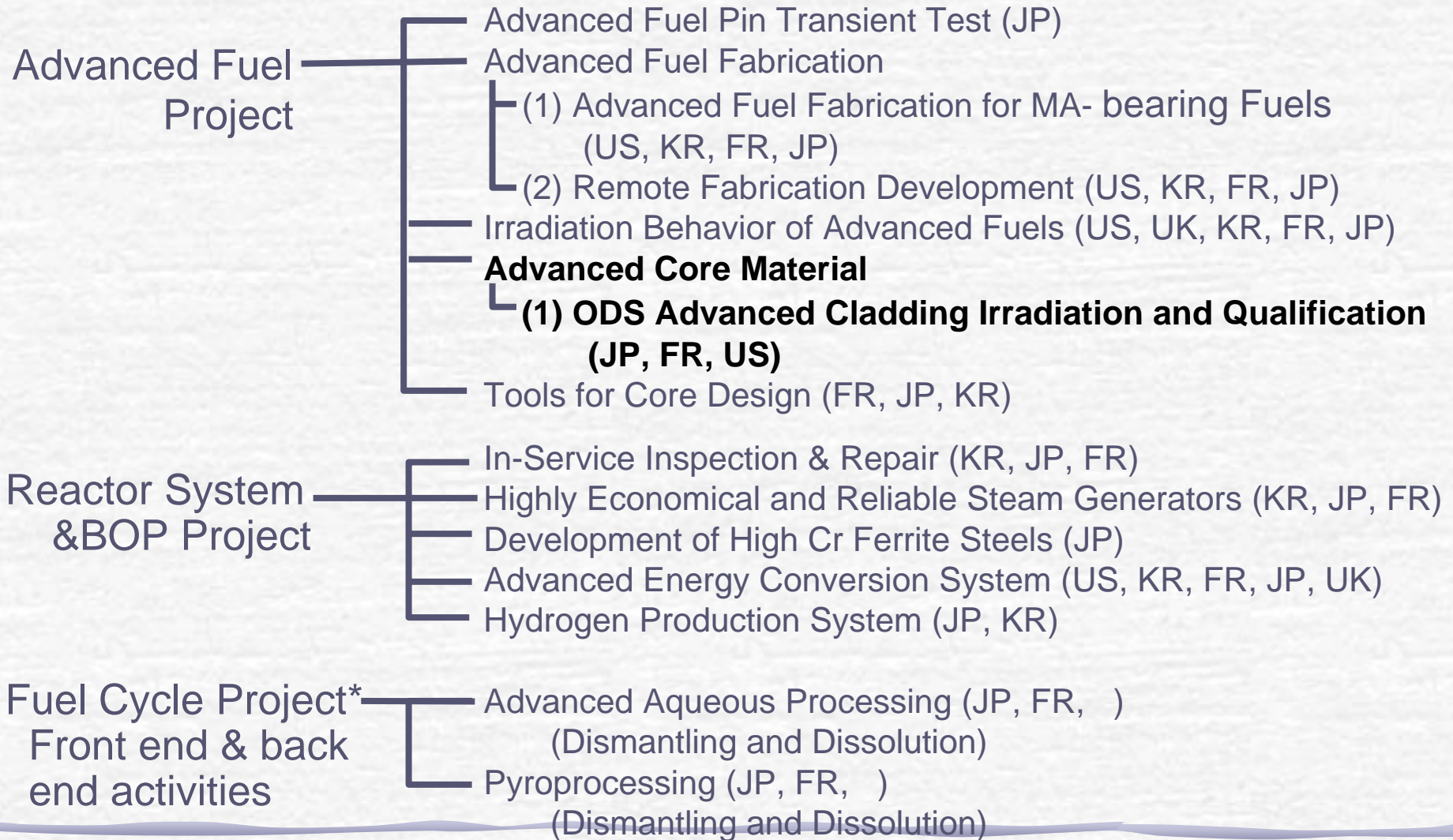
(2) Severe Accident Test (US, KR, JP)

(3) Safety Analysis Tools (US, KR, JP, FR)

Operational Tools

- └ Sodium School (FR)

Priority R&D Project(2)



*Note: Strong Link with Fuel Cycle Crosscut
The Institute of Applied Energy

Lead cooled Fast Reactor R&D

Priority R&D*

Fuels and Materials

- Corrosion control in lead-base coolants
- Cladding and core materials
- Nitride and MA bearing metal fuel

Reactor Systems and BOP

- Coolant monitoring & control including polonium
- Thermal-hydraulics

Safety and Design Evaluation

- Core design

Future R&D

Fuel Cycle

























- Nitride fuel recycle technology





Reactor Systems and BOP

- Supercritical CO₂ Brayton Cycle
- Ca-Br hydrogen production
- In-service inspection technology

* US, JP, KR and CH representatives suggest a single project

Scorecard for System R&D Plans

System	System Definition	Technical Objectives	Project and Task Descriptions	Schedule	Cost Projections	Participants and Collaborations
GFR						
SCWR						
SFR						
VHTR						

-  *Excellent, no improvement needed at this time*
-  *Very Good, with few improvements needed*
-  *Fair, with some substantial improvements needed*
-  *Weak, with considerable improvement needed*

第4世代開発スケジュール

- 2000年1月: 準備会議、ワシントンDC
- 2000年4月: 第1回専門家会議、ワシントンDC
- 2000年8月: 政策、専門家グループ合同会議、ソウル
- 2002年9月: ロードマップの完成
- 2002年10月: 国際連携研究開発実施協定準備の開始(東京会議) 9月19,20日
- 2003年3月: 多国間研究開発の枠組みの議論(ケープタウン会議)
- 4月より: 各システム別の研究計画の準備開始
- 2003年9月: トロント会議 9月24から26日
- 2004年1月: チューリッヒ会議、実施協定議論、研究開発プロジェクト開始の準備
- 2004年5月: アイダホ
- 2004年9月: 濟州島
- 2004年11月: ワシントンDC

Generation IV Nuclear Energy Systems:

Next Steps/Priorities: USDOE

Gen IV "A"

- VHTR → NGNP
- SCWR

Gen IV "B"

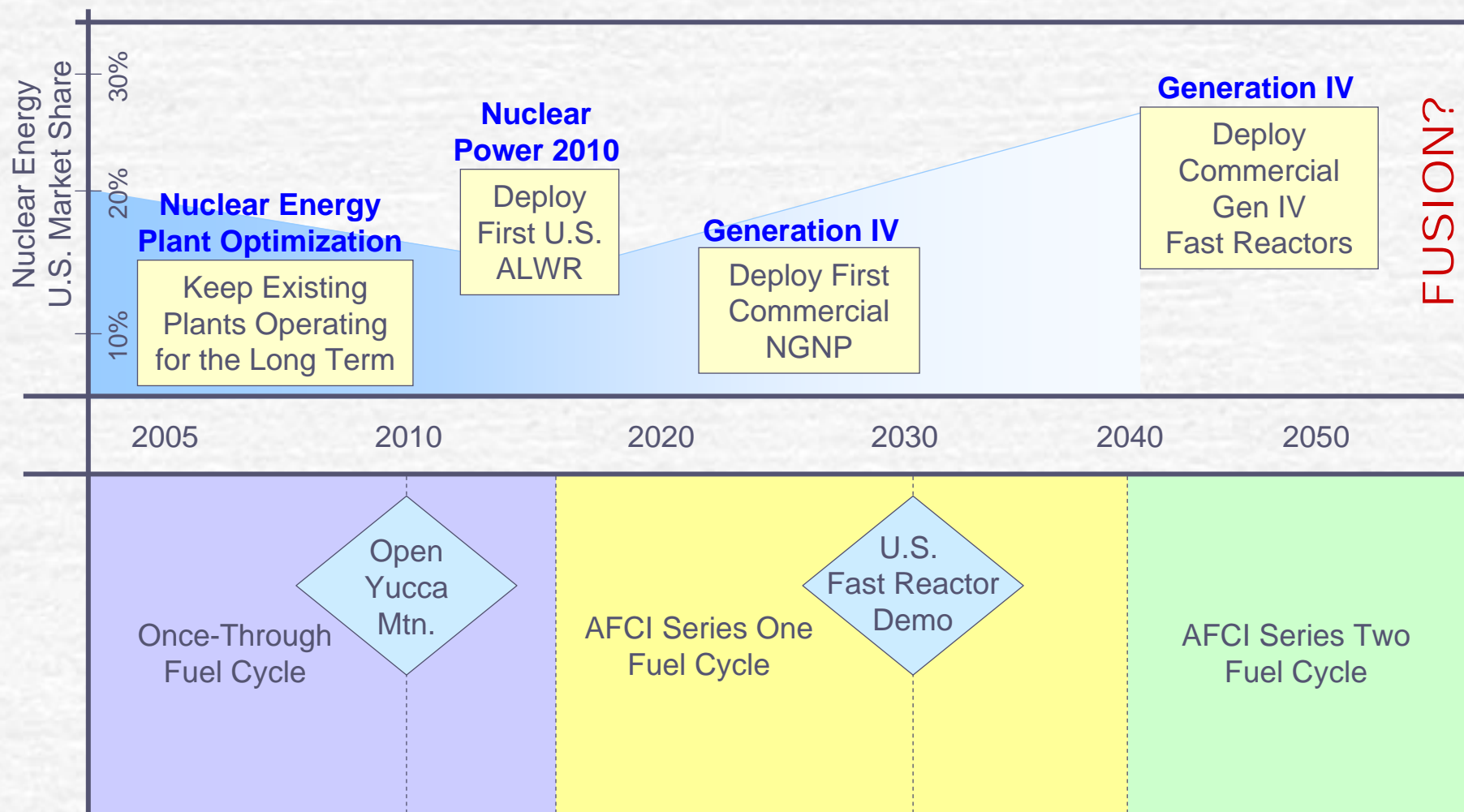
- GFR
 - LFR
 - SFR
- U.S. Fast Reactor ?**

Requirements for A Next-Generation Nuclear Plant (NGNP) Project

- Collaborative with international community
- Collaborative with industry -- especially utilities
- Demonstrate H₂ production and advanced electricity
- Result in a commercially viable plant design

AFCI will support Gen IV by developing fuels and fuel cycle technologies

A Long-Term Strategy : USDOE



「原子力の技術基盤の確保について」 (総合資源エネルギー調査会原子力部会、平成13年7月)

革新的な実用原子力関連技術の開発

- ……エネルギー安定供給の確保を図るため……原子力利用の技術的選択肢を探索する観点から……新型炉技術や新型燃料技術等に関する研究開発を促進……
- ……世界に対する技術的貢献の観点から、更には将来の国際標準化炉の共同開発の可能性をも念頭においた上で、国際的な検討の場への参加を行うことが必要である。

革新炉のねらい

原子力委員会研究開発専門委員会革新炉検討会議論より

- ❖ エネルギー市場の一層の自由化進展を見据えて、世界の原子力技術開発を牽引する自主技術を我が国に育成、蓄積する
- ❖ 革新的原子力システムは、現行の特性を超えて、エネルギーセキュリティの確保、原子力産業の活性化による技術基盤の維持、新産業の創出による経済社会への貢献および社会的受容性の一層の向上
- ❖ 安全な存在として安心感をもって社会の中で認められることを期待

課題 (1)

- 長期的、安定的なエネルギー供給、地球環境問題から原子力エネルギー利用への回帰はあるのか?
- 本質的には持続可能なエネルギーミックスの重要な構成員、「切り札」
- 経済的並びに社会的、政治的な障害
 - 新規プラントの経済的競争力;大型投資へのためらい
 - 放射性廃棄物処分
 - 安全性と核拡散抵抗性(対テロ!)
 - 原子力界への不信感(東電ショック、美浜事故)

課題 (2)

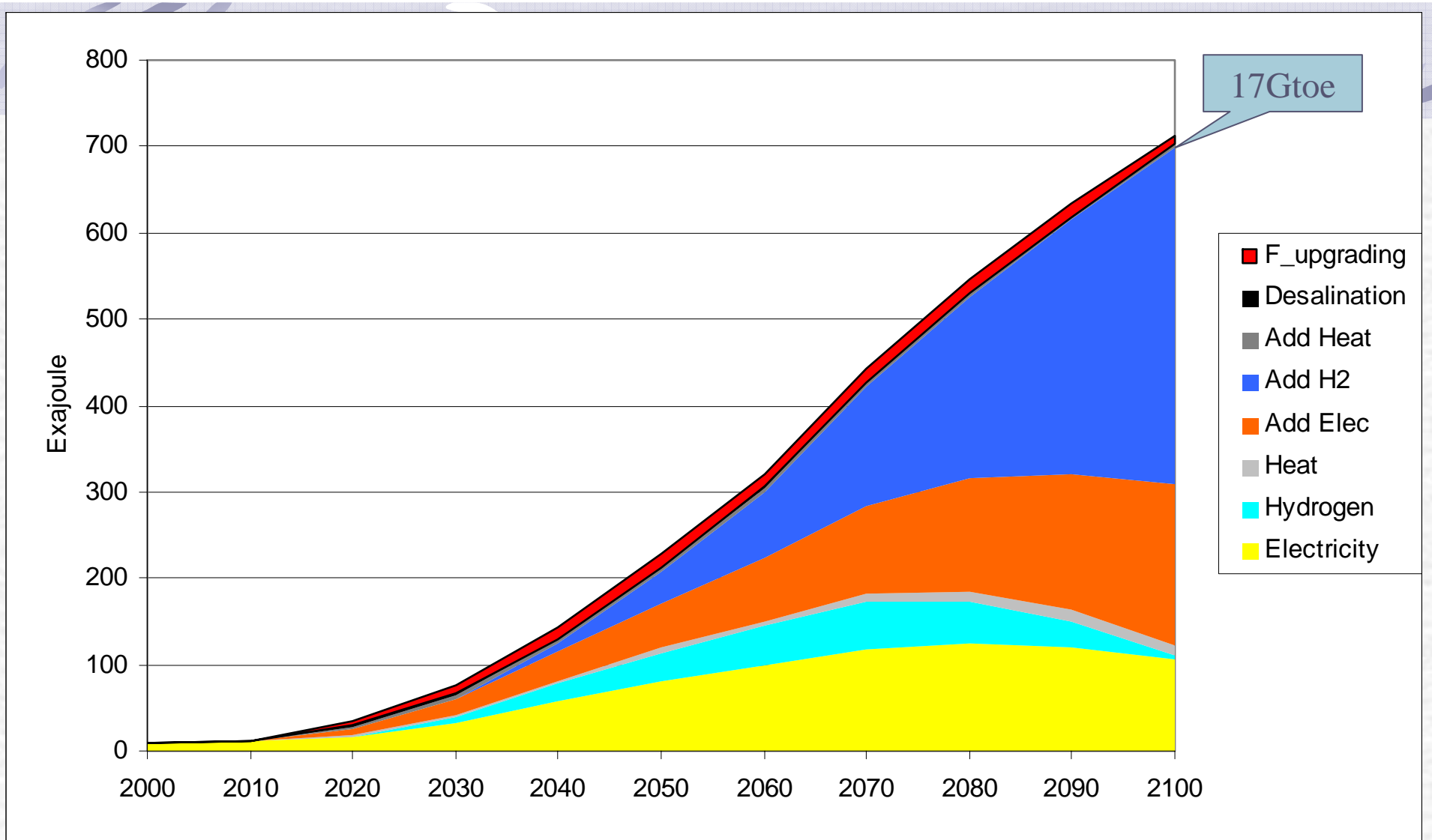
- ❖ 原子力技術研究開発に対する公的支援の規模は縮小しかつ基礎的、基盤的な支援へ変質
- ❖ 電力市場自由化の圧力の影響
- ❖ エネルギーセキュリティ?
- ❖ 京都議定書! CDMからは蹴落とされている
- ❖ 国益と地域エゴの相剋(プルサーマル)
- ❖ 産官学に残る甘え、もたれ合いの構造(社会的な不信の根源)

疑問

- 革新炉、次世代炉とは高速増殖炉ではないのか？
 - 高速炉が必要というパラダイムは生きているのか？
 - 高転換、低減速炉など中間炉の意味はあるのか？
 - 絶対、超安全の小型炉か？
- どこに市場があるのか(Potential market)?
- 電力自由化の中で誰が開発費を持つのか？
- 原子力は人々に受け入れられる様になるのか？
- ますます過剰となる規制は緩和されるのか？
- 原子力村は自己批判したのか？

挑戦 (1)

- ❖ エネルギー供給セキュリティの確保を超えて、国際的なエネルギー技術覇権
- ❖ 国際的なパートナーシップ、オプションシェアリングによる研究開発 例; Gen IV
- ❖ 市場メカニズムの活用と公的なリーダーシップ(2法人統合: 新しい皮袋?)
- ❖ 長期的なエネルギーならびに科学技術戦略に基づく原子力技術開発(新長計)
- ❖ 原子力水素 輸送用エネルギーへの拡大展開
- ❖ 危機(東電トラブル隠し、もんじゅ設置許可無効判決、美浜事故)をチャンスに転換できるか?



原子力発電、水素、熱利用のポテンシャル

A1Tシナリオ(SRES)で原子力利用の拡大を仮定(INPRO/IAEA 2003より)

挑戦 (2)

- わが国の原子力技術開発能力と資源、潜在的可能性は世界最大
 - ABWRなどに代表される軽水炉技術
 - 高速炉; JSFR(JNC)、4S、LSPRなど
 - 高温ガス炉; HTTR(JAERI)、水素製造
 - 超臨界圧炉(岡/東大)
 - 低減速水炉(JAERIほか)
 - 先進再処理(フッ化物揮発法、超臨界圧利用他)
 - 21世紀COEプログラム「世界の持続的発展と革新的原子力」;東京工業大学
 - 原子力大学院;東京大学
- これらを活かして、持続可能な地球社会に貢献する、国際的な産業競争力の強化